

디젤자동차의 배기가스 저감기술

Current Technologies for Abatement of Pollutants Emitted from Diesel Vehicles

김 상 환
S. H. Kim



- 1949년 10월 10일생
- 자동차 배기가스 정화기술
- 정회원, 건국대학교 화학공학과

1. 서 론

디젤자동차는 가솔린자동차에 비하여 연료소비효율(fuel economy)이 20%~35% 정도 높고 고출력을 낼 수 있어 이의 수요가 증가하고 있다. 전세계적으로 1989년에 생산된 디젤엔진은 800 만대에 이르며 이들은 주로 승용차(31%)와 트럭 및 버스(44%)등에 사용되었다. 특히 우리나라는 경유의 가격이 휘발유의 가격에 비하여 저렴하여(휘발유/경유의 가격비=2.6) 디젤자동차의 비중이 높다. 우리나라에서 디젤자동차가 전체 자동차에 대한 비중은 42%로 미국의 3%, 유럽의 20% 그리고 이웃한 일본의 13%에 비하면 매우 높은 수준이다.

가솔린자동차에 대한 배기가스 규제가 엄격하지 않았을 때는 디젤자동차가 배출하는 오염물질은 커다란 문제가 되지 않았으나 가솔린자동차에서 배출되는 오염물질을 제거하는 삼원촉매(three-way catalyst)가 개발되어 CO, HC 및

NO_x를 90% 이상 제거할 수 있게 됨으로써 디젤자동차에서 배출되는 오염물질이 문제시 되었다. 자동차에 의한 대기오염중에서 디젤자동차가 차지하는 비중은 배출량을 기준으로 하여 1990년에 우리나라에서 조사한 바에 의하면 CO가 32%, HC가 37%, NO_x가 83%, SO₂가 98% 그리고 입자상 물질이 90%를 점유하고 있다.^{1~2)} 따라서 자동차에 의한 대기오염 중에서 SO₂, NO_x 및 입자상물질은 대부분이 디젤자동차에서 배출됨을 알 수 있다.

입자상물질은 시각적으로 불쾌할 뿐만 아니라 다핵방향족화합물(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) 같은 발암성 물질을 포함하고 있어 인체에 미치는 피해가 매우 심각하다. 더욱이 대도시에서 출·퇴근시에 시내버스의 빈번한 과승과 트럭의 과적 및 과속 등의 무리한 운전은 배연의 배출을 증가시켜 대기오염을 악화시키고 있다.

미국에서는 일찍이 1982년부터 승용차 및 경화물차(Light duty diesel truck)에서 배출되는 입자상물질의 배출허용기준은 공히 0.6g/mile 그리고 NO_x의 배출허용기준은 승용차 및 경화물차에 대하여 각각 1.0g/mile과 0.6g/mile로 정하였다. 1985년에는 이를 강화하여 입자상물질(particulate)에 대하여 승용차는 0.2g/mile 그리고 경화물차는 0.26g/mile로 정하였으나 이의

규제를 실시하는 시기가 1985년으로부터 1987년으로 연기되자 미국내에서 대기오염에 대한 규제가 제일 엄격한 캘리포니아주에서는 독자적으로 배출허용기준을 정하여 이를 실시하였다.

이와 같이 디젤자동차에 대한 배출허용기준이 연차적으로 강화되고 있으며 디젤엔진의 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, EGR)이나 분사시기조절 같은 연소기술의 개선으로 디젤자동차에서 배출되는 NO_x의 배출은 감소시킬 수 있으나 입자상물질의 배출이 증가되므로 1994년 이후에 미국에서 실시되는 NO_x 및 입자상물질의 배출허용기준을 만족시키기 위해서는 디젤자동차 정화기를 부착해야 될 것으로 사려된다.

미국의 디젤자동차에 대한 규제의 경향에 따라 캐나다, 일본, 독일, 그리스, 스웨덴 등의 여러나라가 디젤자동차에서 배출되는 오염물질을 규제할 계획이다. 우리나라도 1993년부터 농도규제를 총량규제로 바꾸어 시행할 계획이며 단계적으로 디젤자동차에 대한 배출허용기준을 강화하여 2000년에는 미국의 1994년 배출허용기준과 동일한 규제가 적용될 것으로 예측된다. 따라서 디젤자동차의 비율이 42%로 매우 높으며 대기오염 문제가 심각한 우리의 현실에서는 디젤자동차에서 배출되는 입자상물질, NO_x 및 SO₂를 제거할 수 있는 정화기술에 대하여 살펴보는 일은 매우 유의하다고 사려된다.

2. 디젤자동차 배출허용기준

디젤자동차에서 배출되는 화학물질은 1,000여 종이 넘을 것으로 추정되며 확인된 물질만도 100여종이 넘는다. 이 중에서 오염물질로 분류될 수 있는 것으로 CO, HC, NO_x, SO₂ 및 입자상물질 등이 있으며 이 중에서 CO 및 HC는 디젤엔진의 공연비(air fuel ratio)가 높기 때문에 이들이 완전산화되어 Fig.1에서 알 수 있는 바와 같이 가솔린자동차에 비하여 매우 낮은 농도로 배출되므로 더 이상의 처리가 필요없다. NO_x는 가솔린자동차에 비하여 디젤자동차가 적게 배출되나 최소농도는 비슷하여 이를 제거할 필요성이 있

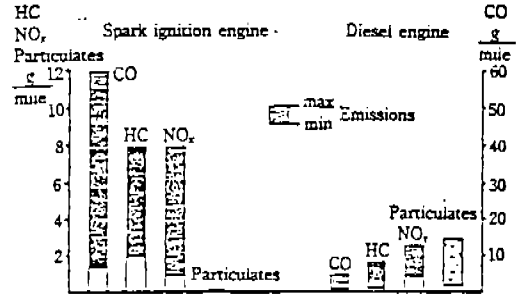


Fig.1 Typical exhaust gas emissions of gasoline and diesel engines in the US-FTP75 test cycle without aftertreatment.

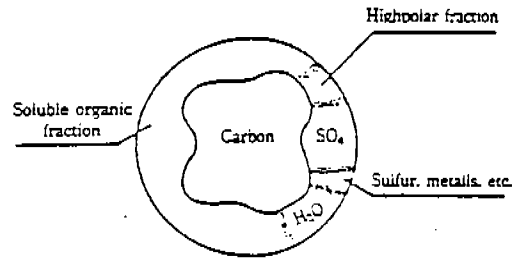


Fig.2 Composition of diesel particulate.

다.

입자상물질은 디젤자동차가 가솔린자동차에 비하여 훨씬 많은 양을 배출한다. 근사적으로 디젤자동차는 가솔린자동차에 비하여 30배~100배의 입자상물질을 배출한다.²⁾ 입자상물질은 Fig.2에 도시된 바와 같이 미연소된 탄소(Soot) 부분에 여러 종류의 고비점 탄화수소가 흡착 또는 응축되고 아울러 여러 종류의 금속, 수분 및 황산염이 부착되어 형성된다. 입자상물질의 크기는 보통 0.1 μ ~0.3 μ 의 아주 미세한 입자로 우리가 호흡하여 체내에 흡입되는 경우에 폐 깊숙히 침투하여 장시간 체류한다.^{4~7)} 더욱이 입자상 물질에는 여러 종류의 다핵방향족화합물이 존재하며 이 중에서 benzopyrene, benzoanthracene, benzofluoranthene, dibenzoanthracene 및 indenopyrene 등은 발암물질로 알려져 있다. 이외에도 입자상물질은 들연면이 및 기관지염, 천식, 심장병 및 독감에 걸린 사람들의 질병을

악화시키는 것으로 밝혀져 있다.

일찍이 1982년부터 디젤자동차에서 배출되는 오염물질에 대하여 규제를 시작한 미국은 점차로 이들의 배출허용기준을 강화시켜 1985년에는 입자상물질에 대하여는 승용차 및 경화물차가 각각 0.2g/mile 및 0.26g/mile로 정하고 NO_x에 대하여도 승용차는 1.0g/mile 그리고 경화물차는 1.2g/mile로 정하였다. 연방정부의 디젤자동차에 대한 배출허용기준의 실시시기가 1985년으로부터 1987년으로 연기되자 캘리포니아주는 단독으로 입자상물질에 대하여 Table 1에 표시된 바와 같이 승용차 및 경화물차에 공히 1985년에는 0.4g/mile, 1986년에는 0.2g/mile 그리고 1989년에는 0.08g/mile로 연차적으로 강화시켰다.

Table 1 Proposed emission standards for light duty diesel vehicles.

	HC g/mi	CO g/mi	NO _x g/mi	Part. g/mi
Federal (50K Mile Certification)				
1985-Passenger Cars	.41	3.4	1.0	.20*
1985-Light Trucks	.8	10	1.2**	.26*
California (100K Mile Certification)				
(50K Mile Particulate Certification)				
1985-Passenger Cars	.46	8.3	1.0	.40
1986				.20
1989				.08
1985-Light Trucks (0-3999lb. I.W.)	.46	10.6	1.0	.40
1986				.20
1989				.08
1985-Light Trucks (4000-5999lb. I.W.)	.50	9.0	1.5	.40
1986				.20
1989				.08

*EPA has proposed delaying these particulate standards until 1987.

**Proposed

중화물차(heavy duty truck) 및 버스는 Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 연차적으로 배출허용기준을 강화시켜 나갈 예정이다. 예로써 중화물차에 대하여는 연방정부와 캘리포니아주 공히 1988년~1990년 모델에 대하여는 0.6g/bhp-hr(gram per brake horse-power hour), 1991년~1993년에 생산되는 중화물차에 대하여는 0.25g/bhp-hr 그리고 1994년이후의 모델에 대하여는 0.1g/bhp-hr로 점진적으로 강화시켜 나갈 예정이다. 캐나다도 1988년부터 디젤자동차에서 배출되는 오염물질을 규제하기 시작하여 입자상물질에 대하여 승용차 및 경화물차에 대하여 각각 0.2g/mile 및 0.26g/mile로 배출허용기준을 정하였고, 앞으로 미국의 규제치를 따라갈 전망이다. 각국에서 현재 디젤자동차에 대하여 법적으로 규제하는 오염물질과 이들의 시험방법이 경디젤자동차와 중디젤자동차에 대하여 각각 Tables 3과 4에 요약되어 있다.

Table 2 Current emission standards for heavy duty trucks and urban buses in USA.

Heavy duty trucks(8,500 LBS GVWR* or over)	
1988-1990 Federal & California	0.6g/bhp-hr**
1991-1993 Federal & California	0.25
1994 and Later Model Year	0.1
Federal & California	
Urban buses	
1988-1990 Federal & California	0.6
1991-1992 Federal	0.25
California	0.1
1993 Federal & California	0.1
1994 and Later Model Year	0.05***
Federal & California	
	0.1

*Gross vehicle weight rating

**Grams per brake horsepower-hour

***EPA may relax to 0.07 based on technical consideration

Table 3 Present diesel exhaust component limitations for light duty vehicles.

Country	Component	Unit	Test
USA	◦ CO, HC, NO _x	g/mile	FTP-75
	◦ Particulates	g/mile	FTP-75
W-Europe	◦ CO, HC, NO _x :	g/Test	ECE : ECE + EUDC
	(HC+NO _x)	g/km	FTP-75
	◦ Particulates	g/Test	ECE : ECE + EUDC
		g/km	FTP-75
	◦ Smoke	% opacity	Steady state at average rpm
Japan	◦ CO, HC, NO _x	ppm	10-Mode

Table 4 Present diesel exhaust component limitations for heavy duty vehicles.

Country	Component	Unit	Test
USA	◦ CO, HC, NO _x	g/hp.h	Transient test
	◦ Particulates	g/hp.h	Transient test
	◦ Smoke	% opacity	3-Modes with transient and steady state conditions
W-Europe	◦ CO, HC, NO _x	g/kWh	13-Mode steady state
	◦ Particulates	g/kWh	13-Mode steady state
	◦ Smoke	% opacity	1-Mode steady state at average rpm
Japan	◦ CO, HC, NO _x	ppm	6-Mode steady state
	◦ Smoke	% opacity	Steady state, full load, various rpm

3. 배기가스 정화기술

디젤자동차에서 배출되는 입자상물질, NO_x 및 SO₂를 줄이기 위하여는 고압분사, 배기가스 재순환(EGR), 분사시기의 조정, 인터쿨링(inter-cooling) 및 연료의 저유황화 등에 의하여 어느 수준까지는 목적을 달성할 수 있으나 강화된 규제치, 예를 들면 1985년의 입자상물질 0.2g/

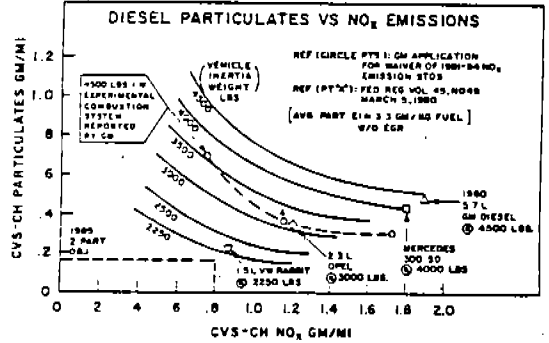


Fig.3 CVS-CH particulate emissions vs. NO_x emissions for light-duty diesel vehicles with inertia weight ranging from 2250 lbs. to 4500 lbs.

mile과 NO_x 1.0g/mile의 배출허용기준을 만족시키기 위하여는 Fig.3에 나타난 바와 같이 CVS-CH(constant volume sampling-cold or hot) 테스트 방법에 의하여 측정된 결과에 의하면 아주 가벼운 디젤자동차 이외의 모든 차량에 배기가스의 정화시설이 필요함을 알 수 있다.⁸⁾

Fig.3으로부터 디젤자동차에서 입자상물질과 NO_x의 배출은 역수관계에 있어 NO_x의 배출량이 감소하면 반대로 입자상물질의 발생이 증가하고 입자상물질의 배출량을 줄이려고 노력하면 반대로 NO_x의 배출이 증가되어 두가지 성분을 동시에 줄이는 것은 어려운 일로 여겨진다. 입자상물질 0.2g/mile과 NO_x 1.0g/mile의 배출허용기준을 만족시키기 위하여 제거해야 되는 입자상물질의 제거율은 디젤자동차의 중량에 따라서 다르나 3,500lb의 중량을 가진 디젤자동차는 80% 이상의 입자상물질을 제거해야 하며 2,500lb의 중량인 디젤자동차는 전자에 비하여 낮은 35%의 입자상물질을 제거하면 규제치를 만족시킬 수 있다.

디젤자동차에서는 공연비가 높아 엔진에서 배출되는 배기가스의 온도가 Fig.4에 도시된 바와 같이 100°C~350°C(212°F~660°F)로 매우 낮다. 따라서 착화온도가 500°C~600°C(900°F~1,100°F)인 입자상물질을 배기가스의 열량만으로

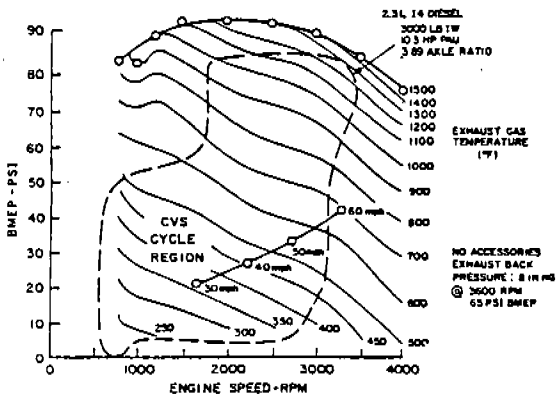


Fig.4 An exhaust temperature map for a 2.3/ diesel engine at steady state conditions.

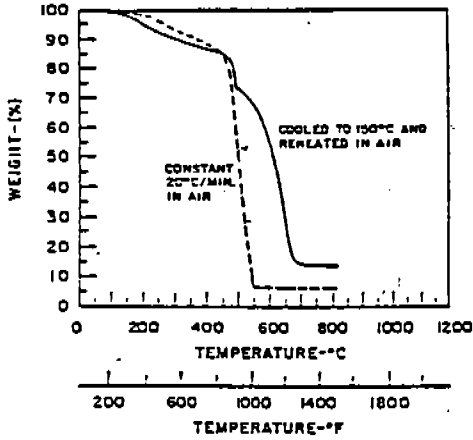
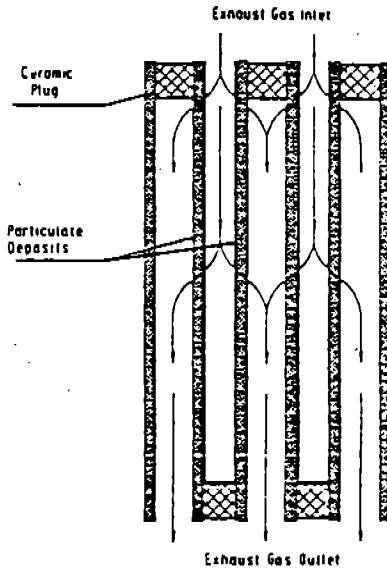


Fig.5 Diesel particulate ignition temperatures as determined from thermogravimetric analysis.

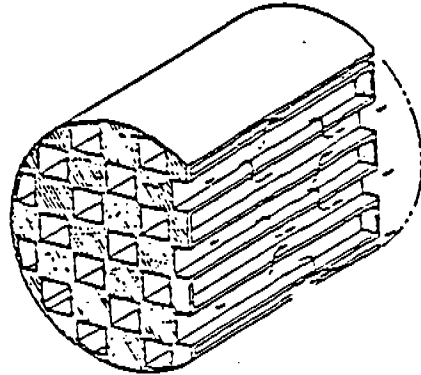


Fig.6 Schematic of ceramic diesel particulate filter(DPF).

는 태울 수 없으므로 외부에서 열을 공급하든지 입자상물질의 착화온도를 배기가스의 온도만으로 연소시킬 수 있을 수준까지 내려야 한다. Fig.5에 입자상물질의 착화온도는 TGA를 이용하여 관찰한 그래프로부터 입자상물질은 500°C(900°F)에서 급격히 연소되어 무게가 감소함을 알 수 있다. 물론 이보다 낮은 온도에서부터 입자상물질에 부착된 휘발성 성분은 증발됨을 알 수 있다.

하는 방법은 기본적으로 여과장치를 사용하며 크기가 큰 입자상물질이 이보다 크기가 작은 기공(pore)을 가진 물질을 통과할 때 트랩(trap)이 되어 입자상물질이 제거된다. 이러한 트랩으로는 Fig.6에 보인 바와 같은 세라믹 모노리스(ceramic monolith)와 Fig.7에 나타난 바와 같은 세라믹폼(ceramic foam), 와이어 메쉬(wire mesh) 및 세라믹 섬유코일(ceramic fiber coil) 등이 있다. 현재 가장 많이 이용되고 있는 트랩은 세라믹 모노리스이며 재료는 주로 음접이 매우

디젤자동차에서 배출되는 입자상물질을 제거

높은 cordierite($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$)이고 이는 보통 $1,370^{\circ}C \sim 1,480^{\circ}C$ ($2,500^{\circ}F \sim 2,700^{\circ}F$)까지는 열적으로 안정하며 열팽창계수가 매우 낮아 열충격저항이 우수하다.

세라믹 모노리스는 주로 셀밀도(cell density)가 $100\text{cells}/\text{in}^2$ 이고 벽두께가 0.017inch 그리고 통로의 크기가 0.083inch 인 세라믹이 사용된다. 이러한 세라믹 모노리스는 트랩의 단위부피당의 여과면적이 $16.6\text{in}^2/\text{in}^3$ 로 매우 높아 입자상물질의 여과에 효과적이다. Fig.6에 도시된 바와 같이 입자상물질을 포함하고 있는 배기가스가 교대로 막힌 통로를 가진 트랩의 입구에 오면 그 통로의 출구는 막히어 있으므로 배기가스는 자연스럽게 모노리스의 벽을 통과하여 이웃한 통로를 통하여 트랩의 출구로 나가게 된다. 이때에 기공의 크기가 마이크론이하인 벽을 통과하면서 입자상물질이 여과된다. 계속하여 입자상물질이 벽에 쌓이면 역압(back pressure)이 증가하여 엔진의 성능을 떨어뜨리고 연료소비효율이 감소함으로 이를 주기적으로 연소시켜 트랩을 재생(regeneration)시켜야 한다. 보통 역압이 1 inchHg 증가하면 연료 소비효율이 1%가량 떨어진다고 보

고되고 있다. 이때에 입자상물질이 세라믹 모노리스에 축적되면서 역압이 증가하는데 압력증가속도(pressure rise rate)나 역압이 너무 높으면 온도 차이에 의한 열충격에 의하여 트랩이 파괴 및 용융되어 버린다.¹⁰⁻¹¹⁾

디젤자동차에서 배출되는 입자상물질 등을 제거하는 정화기술은 크게 트랩기술, 재생기술과 제어 및 센서기술로 나눌 수 있다. 따라서 디젤자동차에서 배출되는 오염물질을 대폭 절감시키고 대기오염 문제를 해결하기 위하여 이들을 각각 자세히 살펴보기로 한다.

3.1 트랩기술(trap technology)

현재 디젤자동차에서 배출되는 입자상물질 등을 제거할 수 있는 트랩으로는 이미 살펴 본 바와 같이 세라믹 모노리스, 세라믹폼, 와이어메쉬, 세라믹 섬유매트(ceramic fiber mat) 및 세라믹 섬유코일 등이 있다. 이들의 입자상물질 제거율과 장·단점이 Table 5에 나타나 있다.¹²⁾ 이 중에서 세라믹 섬유매트는 GM에서 연구중이며¹³⁾ 세라믹 섬유코일은 Benz에서 중화물차에 사용하기 위하여 연구를 진행중이다.¹⁴⁾ 트랩으

Table 5 Type of diesel particulate filters(DPF).

Filter type	Efficiency range	Advantages	Disadvantages
Ceramic monolith	60%~90%	- high efficiency - low cost - can be catalyst-coated	- moderately high backpressure - very high backpressure rise rate - cracking due to thermal stress
Alumina-coated wire mesh (precious metal catalyst)	50%~80%	- low backpressure rise rate - self-regeneration capability - reduces HC, CO, and odor	- moderately high backpressure - lower efficiency, especially at high speeds - sulfate production
Ceramic foam	30%~75%	- resistant to thermal cracking - can be catalyst-coated	- very high backpressure - difficult to regenerate - lower efficiency
Ceramic fiber mat	75%+	- very high efficiency possible - no thermal cracking	- fiber shedding - high backpressure - high backpressure rise rate - high weight and bulk
Silica-fiber wound "candles"	75%+	- high efficiency - low backpressure - no thermal cracking	- possible large volume requirement

로서 앞으로 관심이 집중되는 분야는 세라믹 모노리스, 세라믹폼 및 와이어 메쉬이다.

세라믹 모노리스는 가장 많은 연구가 진행되고 실용화를 위하여 개발된 트랩이다. Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 입자상물질의 제거율(60%~90%)이 높고 열에 안전하며 내구성이 높고 저렴하다. 역압이 높고 압력증가속도가 빠르며 열충격에 의하여 세라믹의 파괴나 용융의 염려가 있으나 이러한 단점은 세라믹 모노리스가 가진 장점에 비하면 문제가 되지 않는다. 더욱이 이들은 원하는 기공율, 셀밀도 및 벽두께를 용이하게 조절할 수 있으며 귀금속이나 비귀금속(base metal)을 모노리스의 벽에 쉽게 피복할 수가 있어 널리 이용되고 있다.

높은 역압과 압력증가속도는 트랩의 크기를 증가시키거나 빈번한 트랩의 재생에 의하여 감소시킬 수 있다. 그러나 트랩의 내부와 외부의 온도차로 생기는 열응력(thermal stress)에 의한 세라믹의 파괴는 좀더 심각한 문제이다. 트랩의 재생시 모노리스의 내부가 외부보다 갑자기 온도가 상승함에 따라서 온도차에 의한 열응력이 모노리스를 파괴시킨다. 이러한 모노리스의 파괴를 막을 수 있는 방법이 다각도로 연구중이다. 그중의 한 가지 방법으로는 배기가스 온도 및 유량 그리고 트랩부하량(trap loading) 같은 트랩의 운전조건을 정확하게 유지하여 모노리스의 파괴를 방지하는 것이다. 또 다른 한 가지 방법으로는, 세라믹 모노리스에 열응력을 흡수할 수 있는 "미세균열(microcrack)"을 세라믹 모노리스에 만드는 것이다.¹⁵⁾

세라믹 모노리스는 규제치를 만족할 수준의 높은 입자상물질의 제거율을 가지고 역압이 입자상물질이 하나도 축적되지 않았을 경우에 비하여 4배 이하가 되도록 낮아야 하며 압력증가속도가 완만하여 열충격에 의한 세라믹 모노리스의 파괴가 없어야 한다. 이외에도 세라믹 모노리스는 높은 내열성을 가지고 50,000mile 이상을 운전하여도 성능이 보장되는 내구성과 안정성등을 가져야 한다.^{16~17)}

와이어 메쉬 트랩은 Johnson-Matthey에 의하여 개발된 입자상물질 제거장치로 Fig.7에서 알

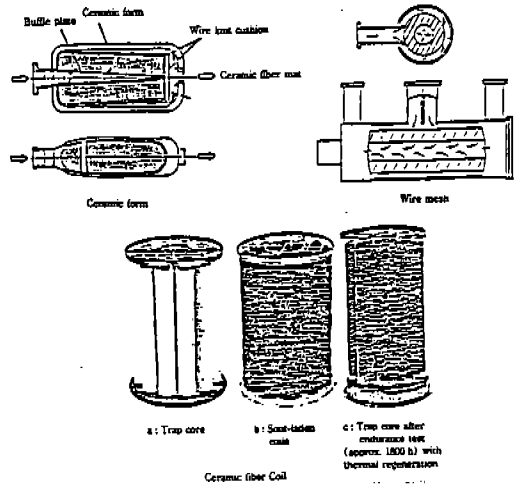


Fig.7 Filtering materials for diesel particulate trap.

수 있는 바와 같이 배기가스가 실린더의 바깥에서 안쪽으로 이동하면서 입자상물질이 트랩되어 제거된다. 트랩은 귀금속 촉매로 피복되어 배기가스 중에 포함된 CO 및 HC를 산화시키는 물론 입자상물질의 착화온도를 500℃~600℃로부터 350℃~400℃까지 낮출 수 있어 트랩의 재생을 용이하게 한다. 세라믹 모노리스에 비하여 역압이 약간 낮고 압력증가속도가 완만하며 스테인레스 와이어 메쉬는 트랩의 파괴나 용융같은 염려는 없다. 그러나 입자상물질의 제거율이 고속에서 특히 낮고 황산염을 형성하는 것이 중요한 해결해야 될 문제이다.

3.2 재생기술(regeneration technology)

트랩의 재생은 축적된 입자상물질을 연소시켜 태워버림으로써 트랩의 성능을 다시 갖도록 하는 과정이다. 입자상물질을 연소시키기 위하여는 이들의 온도를 착화온도까지 올려야 한다. 보통 산소가 충분한 경우에 입자상물질의 착화온도는 500℃~600℃(900°F~1,100°F)이고 산소가 없는 경우에는 착화온도가 증가하고 반대로 산소가 충분하면 착화온도는 감소한다. 그러나 디젤엔진에서 배출되는 배기가스의 온도는 100℃~350℃(212°F~660°F)로 매우 낮아 배기가스가 가진

열량만으로는 입자상물질을 착화시킬 수 없으므로 외부에서 에너지를 공급하든지 입자상물질의 착화온도를 떨어뜨리어 배기가스의 온도만으로 이를 연소시키는 것이다.

트랩의 재생을 위한 기본적인 방법은 이미 살펴 본 바와같이 배기가스나 트랩의 온도를 입자상물질을 착화시키기에 충분한 온도까지 올리든지 입자상물질의 착화온도를 연료첨가제를 넣든지 트랩의 벽에 촉매를 피복시켜 필요한 수준까지 떨어뜨리어 연소시키는 방법이다. 이

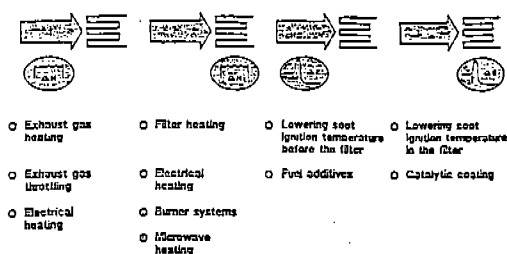


Fig.8 Schematic representation of various diesel particulate filter(DPF) regeneration principles.

러한 일련의 방법들이 Fig.8에 자세히 나타나 있다. 배기가스의 온도를 올리는 방법으로는 오일-버너나 전기를 사용하여 외부에서 에너지를 공급하든지 엔진의 스로틀링(throttling)에 의하여 일시적으로 배기가스의 온도를 상승시킨다. 그렇게 함으로써 입자상물질을 착화시키기에 충분한 온도까지 배기가스를 가열한다. 다음으로는 트랩의 온도를 상승시키는 방법이다. 이러한 목적으로 전기나 마이크로웨이브(microwave) 혹은 버너를 이용할 수 있다. 이와 같이 트랩의 온도를 상승시켜 이를 재생시키기 위하여는 자동으로 조절되는 두 개의 트랩을 사용하여 한개의 트랩에서 입자상물질이 축적되는 동안에 다른 트랩에서는 트랩을 가열시켜 이를 재생시킨다.

입자상물질의 착화온도를 떨어뜨리어 트랩을 재생시키는 방법에는 연료에 입자상물질의 착화온도를 떨어뜨릴 수 있는 연료첨가제(fuel additive)를 넣든지 트랩의 벽에 입자상물질을 낮은 온도에서 연소시킬 수 있는 금속이나 비귀금속 산화물(V_2O_5 등)을 피복시켜 입자상물질을 낮은

Table 6 Promising diesel particulate filter(DPF) systems.

System	Estimated cost range	Advantages	Disadvantages	Development status/probability of successful development
Ceramic monolith/ burner regeneration	\$ 300-550 first cost \$ 700-950 life-cycle	- well developed	- Costly/complex	- Prototypes have undergone durability tests. development is proceeding.
Catalyzed metal mesh/HC and CO enrichment of exhaust	\$ 200-450 first cost \$ 500-650 life-cycle	- Simple regeneration system	- Lower trapping efficiency - Sulfate production	- Prototypes have undergone durability tests. development is proceeding.
Ceramic monolith/ self-regeneration using fuel additives	\$ 200-400 first cost \$ 300-550 life-cycle (\$ 500-850 if trap replacement is required)	- Simple regeneration system	- Environmental questions - Possible regeneration failure in unusual driving conditions	- Prototypes have undergone durability tests. development is proceeding.
		- High trapping efficiency	- Inexpensive	- Probability of success is moderate.
			- Trap plugging with additives	

온도에서 연소시켜 입자상물질을 제거하는 것이다. 입자상물질의 착화온도를 떨어뜨리기 위하여 사용하는 연료첨가제에는 주로 구리, 망간, 세륨 및 철 등의 유기화합물이 있다.^{18~22)} 이러한 여러가지의 트랩 재생방법 중에서 Table 6에 표시된 바와 같이 많은 연구가 진행되고 전망이 밝은 오일버너 재생(burner regeneration), 열재생(thermal regeneration) 및 자기재생(self-regeneration) 방법을 중심으로 살펴보기로 한다.

세라믹 모노리스에 오일버너를 사용하여 이를 재생하는 방법은 Ford의 Wade⁸⁾에 의하여 처음으로 소개된 후에 거의 모든 자동차회사에서 앞다투어 연구되고 개발되었다. 오일버너 재생은 여러가지의 에너지를 이용할 수 있고 에너지 방출속도(energy release rate)가 매우 높으며 여러 회사에서 연구가 수행되어 이에 대한 기술이 잘 확립되어 있는 장점을 가지고 있다. 반면에 시스템이 복잡하여 가격이 비싸고 특히 고온의 산화분위기에서 배기가스의 입자상물질 농도가 높은 경우에 재생의 신뢰도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 트랩을 재생하는 동안에 엔진의 배기가스가 우회하여 대기중으로 방출되도록 하는 bypass trap과 엔진의 배기가스가 트랩을 통하여 재생시 계속하여 흐르게 하는 in-line trap으로 나눌 수 있다. In-line trap은 Fig.9에 나타난 바와 같이 by-pass trap에 비하여 에너지 소모량이 8배 정도 많아 에너지 손실이 많다.

Fig.10에 오일버너 재생시스템을 가진 in-line trap이 나타나 있으며 트랩에 들어가는 배기가스의 온도를 균일하게 유지하기 위하여 오일버너에서 맴돌이(swirl)가 완전하게 일어나도록 공기를 버너의 접선방향으로 도입시킨다. 트랩에 들어가는 배기가스의 온도를 650°C(1,200°F)로 유지하기 위한 이론적인 버너의 유량은 엔진의 속도와 부하량에 따라서 다르나 엔진에 들어가는 연료의 0.2~2.0배의 버너 연료가 소모된다.²³⁾ By-pass trap은 에너지의 낭비를 막고 좀더 정확하게 트랩의 재생을 제어할 수 있으나 추가로 사용되는 밸브 및 작동기(actuator) 등으로 트랩의 가격이 상승한다. 트랩에 들어가는 배기가

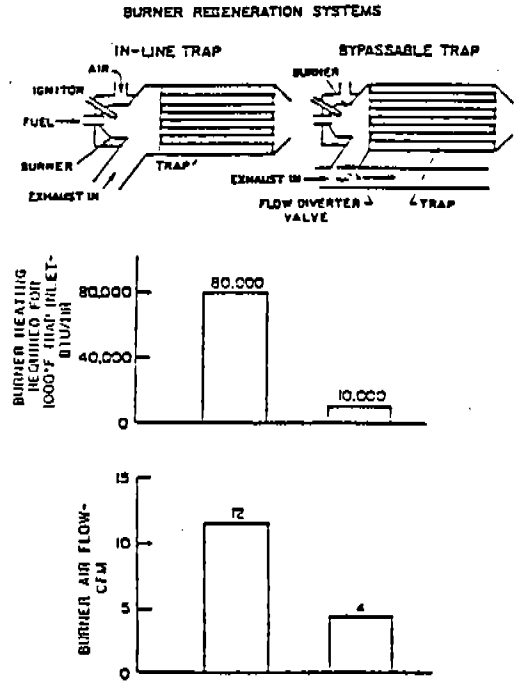


Fig.9 A comparison of the configuration, burner heating requirement and burner air flow for a trap with an in-line burner and a bypassable trap with a burner regeneration system.

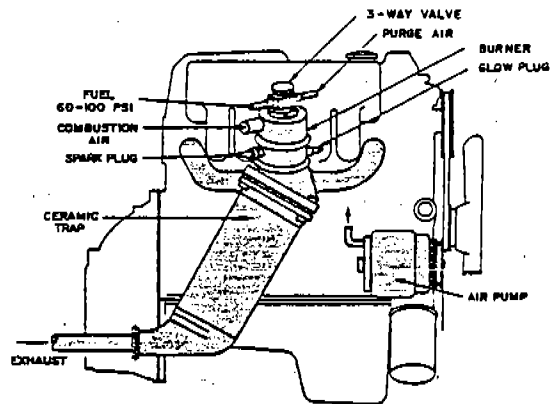


Fig.10 In-line burner regeneration system and particulate trap configuration installed on an engine.

스의 온도에 따라서 재생시간이 달라지는데 배기가스의 온도가 540°C(1,000°F) 이하이면 트랩이 완전히 재생이 되지 않으며 540°C(1,000°F) 이상이 되어야 완전히 재생된다. 재생시간도 배기가스의 온도가 540°C(1,000°F)이면 10분이 걸리나 590°C(1,100°F) 이상이 되면 2분 이내에 트랩이 완전히 재생된다.

By-pass trap을 재생시키는 방법이 Fig.11에 표시된 바와 같이 트랩을 통한 압력차가 50in H₂O가 될 때까지 입자상물질을 모노리스의 벽에 축적시킨다. 이것은 40mph로 운전하는 경우에 90mile을 운전한 거리에 해당한다.

배기가스를 우회시키고 글로우 플러그(glow plug)를 작동시킨다. 20초 정도후에 오일버너에 들어가는 연료를 공급하고 동시에 이를 연소시킬 공기도 흘러 보낸다. 이때에 공연비는 20 : 1 정도로 고정하며 2분 정도가 지나면 트랩에 들어가는 연소가스의 온도가 650°C(1,200°F)에 도달하여 입자상물질을 착화시킨다. 4분 정도가 지난 후 오일버너에 들어가는 연료를 중단하여도 연소파는 계속하여 트랩을 따라 진행하면서 입자상물질을 태워버린다. 9분 정도가 지나면 재생이 완료되므로 공기의 공급을 중단하고 우회시키던 배기가스를 다시 트랩을 통하여 흘러가도록 하며 똑같은 과정을 반복한다. 트랩이 재생되는 동안에 트랩 내부의 온도는 Fig.11에 보인 바와 같이 최고온도가 1,090°C(2,000°F) 이상으로 올라가므로 세라믹이 열적으로 안정하다고 인정될 수 있는 1,200°C(2,200°F) 이하가 되도록 공기의 유량을 유지하는 것이 매우 중요하다.

트랩을 사용하는 디젤자동차에서 연료소비효율이 떨어지는 이유는 축적된 입자상물질에 의한 역압과 재생하는데 사용되는 연료의 소비 때문이다. 전체적인 연료소비효율의 감소는 Fig.12에 나타난 바와 같이 재생간격에 따라서 연료소비효율의 감소가 최소가 되는 조건이 존재한다. In-line trap은 8.3% 인 반면에 by-pass trap은 1.8%의 연료소비효율이 감소되므로 by-pass trap의 경우에 재생간격은 50mile로 하는 것이 이론적으로는 타당하나 여러 가지의 입자상물

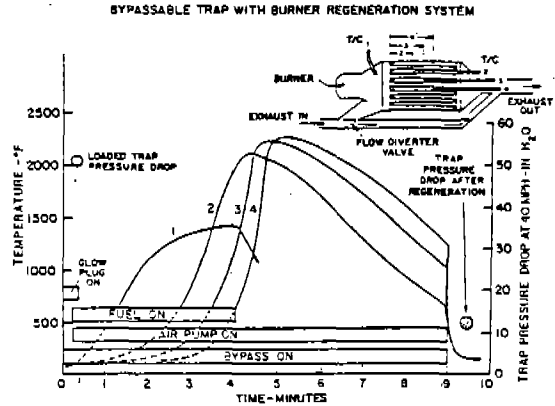


Fig.11 Regeneration process showing temperature levels versus time and back pressure levels of a bypassable trap with a burner regeneration system.

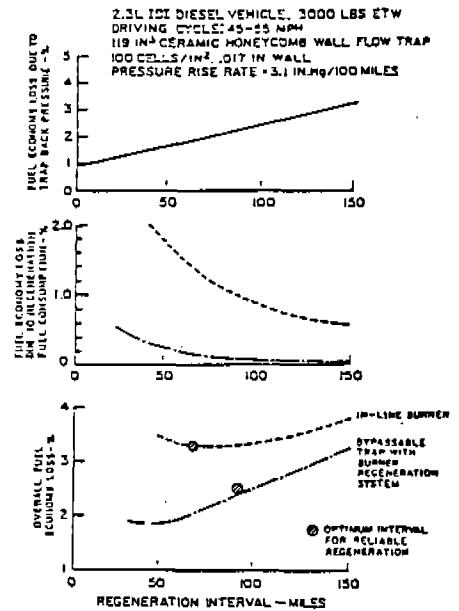


Fig.12 Projected fuel economy loss due to the trap back pressure, due to the regeneration energy and the combined total fuel economy loss as a function of the regeneration interval mileage for a trap with an in-line burner and a bypassable trap with a burner regeneration system.

BYPASSABLE TRAP WITH AN ELECTRIC REGENERATION SYSTEM

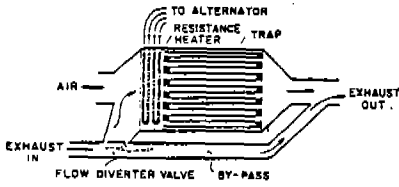


Fig.13 Schematic of a bypassable trap with an electric regeneration system.

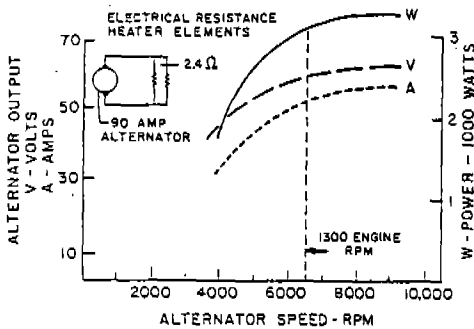


Fig.14 Voltage, current and power output of a 90 amp alternator connected to an electric resistance heater versus alternator speed.

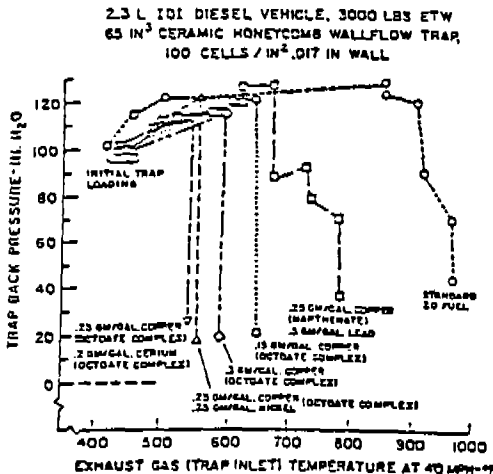


Fig.15 Back pressure versus trap inlet gas temperature for several fuel additives.

질의 불균일성과 지속적으로 재생이 가능하기 위하여는 90mile의 간격으로 하는 것이 적당하다. 전기로 가열하는 경우의 by-pass trap의 Figs.13 과 14에 요약되어 있다.

디젤자동차의 연료에 입자상물질의 착화온도를 떨어뜨리기 위하여 여러가지의 연료첨가제를 넣는다. 구리와 납을 각각 0.25g/gal과 0.5g/gal을 디젤자동차의 연료에 첨가한 경우에 입자상물질의 착화온도가 160°C(300°F) 이상 떨어진다. 구리와 납 이외에도 니켈, 망간 및 세륨 등의 연료첨가제를 사용한 경우에 입자상물질의 착화온도가 감소하는 경향이 Fig.15에 비교되어 있다. 구리와 납은 착화온도가 감소하는 면에서는 우수하나 여러 가지의 문제점을 내포하고 있다. 예를 들면 연료속에서 불안정하여 연료첨가제를 혼합한 잠시 후에 구리가 침전물로 석출된다. 납은 그의 독성 때문에 사용이 곤란하며 이를 연료첨가제로 사용하는 경우에 트랩에 납이 축적되어 트랩의 수명을 20,000mile 이하로 단축시킨다. 따라서 독성이 없고 구리 및 납과 같은 정도의 성능을 가진 연료첨가제의 개발에 박차를 가하고 있다. 이들은 구리, 니켈, 세륨, 몰리브덴, 망간, 아연 칼슘 및 바륨 같은 유기금속 화합물이며 이 중에서 구리, 니켈 및 세륨의 octoate화합물이 입자상물질의 착화온도를 감소시키는데 효과가 있다고 보고되고 더욱이 고온에서의 octoate화합물이 분해되어 금속산화물을 형성하므로 이들이 입자상물질의 산화에 촉매 역할을 하여 입자상물질을 낮은 온도에서 제거할 수 있다. 이와 같은 연료첨가제를 사용하여 트랩을 재생하는 경우에 트랩의 중앙에 위치한 지점의 온도변화는 480°C(900°F) 이하이므로 세라믹 모노리스의 파괴나 용융에 아무런 지장을 초래하지 않는다.

3.3 제어 및 센서기술(control and sensor technology)

디젤자동차의 정화기에서 필요한 제어시스템은 사용하는 트랩과 재생방법에 따라서 크게 다르게 된다. 자기재생을 하는 트랩에서는 특별한 제어시스템이 필요하지 않으나 트랩의 실패

를 방지하기 위한 제어시스템이 필요한 정도이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 일정한 역압에 도달하면 자동으로 열리는 우회밸브(bypass valve)와 이를 경고시키는 경고등이다. 자기재생 이외의 재생방법을 사용하는 트랩에서는 언제 재생을 해야 되는지를 결정하고 재생을 시작하며 그리고 재생이 완료된 것을 확인할 수 있는 센서, 제어기 및 작동기가 필요하다. 재생 방법에 따라서 여러종류의 추가적인 제어시스템이 필요하게 된다. 예를 들면 오일버너 재생 시스템에서 버너에서 착화가 되었는지를 확인하여 만일에 착화가 되지 않고 연료만 분무되는 경우에는 화재의 위험이 있기 때문에 이를 제어할 수 있는 시스템이 필요하다. 이러한 제어 및 센서기술에서 중요한 부분의 하나가 압력을 측정할 수 있는 센서이다. 더욱이 내구성이 우수하고 신뢰도가 높으며 온도가 입자상물질의 변화에 대하여 안정한 압력센서의 개발이 필요하다.

4. 결 어

디젤자동차에서 배출되는 수많은 화학물질 중에서 문제가 되고 있는 입자상물질, NO_x 및 SO_2 를 제거하는 기술에 대하여 살펴 보았다. 이러한 오염물질의 저감을 위하여는 배기가스 재순환, 분사시기의 조절, 인터쿨링 같은 연소기술의 개선과 유황분이 적고 방향족화합물의 함량이 적은 청정연료를 사용하여 어느 수준까지는 목적을 달성할 수 있다. 특히 우리나라의 경유에는 유황분의 함량이 0.4%이고 방향족화합물에 대한 규제가 선진국에 비하면 느슨한 편이다. 디젤자동차가 전체 자동차의 42%인 우리나라의 입장에서 디젤자동차에서 배출되는 배기가스에 대한 배출허용기준의 강화와 아울러 후처리기술에 대한 연구와 투자가 시급히 이루어져야 한다. 디젤자동차에서 배출되는 입자상물질에는 여러 종류의 발암물질과 돌연변이성 PAH 등이 포함되어 있어 인체에 미치는 영향이 심각하므로 더욱 이의 기술개발이 절실하다.

디젤자동차 배기가스 정화기술에서 중요한

트랩기술, 재생기술 및 제어와 센서기술에 대하여 살펴 보았다. 현재 가장 유망한 정화기술은 세라믹 모노리스에 오일버너재생, 유기금속계통의 연료첨가제를 사용하는 자기재생 및 열재생 방법 등이다. 아직은 트랩기술이나 재생기술에 비하면 제어 및 센서기술은 뒤늦은 감이 있으나 매우 중요한 부분이다. 특히 트랩의 역압을 측정할 수 있는 압력센서의 개발은 시급한 과제이다.

참 고 문 헌

1. 고재영, "자동차공해 방지대책 추진방향", 저공해 자동차 기술에 관한 심포지움, 서울(1991).
2. 조강래, "한국의 디젤자동차 매연 방지기술", 경유자동차 입자상물질방지기술 세미나, 서울(1991).
3. B.H. Englar, "Diesel Emission Control", International Seminar on Diesel Particulate Control Technology, Seoul, Korea(1991).
4. G. Greeves and C.H.T. Wang, SAE Paper 810260(1981).
5. G.W. Smith, SAE Paper 820466(1982).
6. W.J. Mayer, D.C. Lechman, and D.L. Hilden, SAE Paper 800256(1980).
7. N.J. Khatri, J.H. Johnson and D.G. Leddy, SAE Paper 881174(1988).
8. W.R. Wade, J.E. White and J.J. Florek, SAE Paper 810118(1981).
9. K. Otto, et al., SAE Paper 800336(1980)
10. SAE, SAE Publication SP-816(1990).
11. T. Mizrah, et al., SAE Paper 890172(1989).
12. C. Weaver, SAE Paper 831713(1983).
13. J.S. MacDonald and G.L. Vaneman, SAE Paper 810956(1981).
14. Daimler-Benz, AG : EPA Docket #A-81-20(1981).
15. N. Higuchi, S. Mochida and M. Kojima, SAE Paper 830078(1983).
16. J.S. Howitt and M.R. Montierth, SAE Paper

- 810114(1981).
17. G. Lepperhoff and G.Kroon, SAE Paper 850 013(1985).
 18. A.F. Ahistrom and C.V.I. Odenbrand, Applied Catalysis, 60, 143(1990).
 19. R.K. Herz and R.M. Sinkevitch, Carbon, 24, 457(1986).
 20. S. Meinrad and C. Giorgio, SAE Paper 890170 (1989).
 21. K. Pattas, et al., SAE Paper 900109(1990).
 22. W.R. Wade, J.E. Florek, J.E. White, and H.A. Cikanek, SAE Paper 830083(1983).
 23. V.D. Rao, J.E. White, W.R. Wade, M.G. Aimeone, and H.A. Cokanek, SAE Paper 850814 (1985).